УДК 330.332

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ВЫБРОСОВ

Дворецкий Р.А., студент 1 курса магистратуры
Научные руководители – Прохоров С.Г., кандидат технических наук; Субаева А.К., доктор экономических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ»
Чистопольский филиал «Восток», г. Чистополь

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания, экологические выбросы, снижение выбросов, нейтрализация отработавших газов, каталитический нейтрализатор, сажевый фильтр (DPF), система SCR, рециркуляция отработавших газов (EGR), прямой впрыск, альтернативное топливо, синтетическое топливо (e-Fuels), гибридные силовые установки, экологические стандарты.*

В статье рассматриваются современные методы снижения экологических выбросов двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Автор анализирует ключевые направления разработок: оптимизацию процессов сгорания, применение альтернативных видов топлива и внедрение систем нейтрализации отработавших газов. Особое внимание уделяется комбинированному эффекту от данных технологий и их роли в выполнении строгих экологических стандартов. Материал предназначен для специалистов, интересующихся перспективами развития и экологизацией традиционных силовых установок.

Введение. Вопрос антропогенного воздействия автотранспорта на состояние атмосферы продолжает оставаться в фокусе внимания мирового сообщества. Хотя тренд на электрификацию личного транспорта очевиден, глобальный автопарк, оснащенный традиционными двигателями внутреннего сгорания (ДВС), насчитывает более 1.5 миллиардов единиц, что гарантирует его доминирующее положение в ближайшие 20-30 лет. Важно подчеркнуть,

что целые отрасли, включая грузовое судоходство, авиацию, тяжелое машиностроение и сельское хозяйство, технологически и экономически привязаны к ДВС в силу беспрецедентной энергоемкости жидких углеводородных топлив, а альтернативы в этих секторах находятся на стадии пилотных проектов.

Экологическая опасность ДВС связана с комплексом токсичных компонентов в составе выхлопных газов: оксиды азота (NOx), углеродная сажа, несгоревшие углеводороды (HC) и угарный газ (CO). Отдельным, глобальным вызовом выступают выбросы диоксида углерода (CO2) — ключевого парникового газа. Реакцией инженерной мысли на эти вызовы стал многоуровневый подход, включающий как глубокую модификацию самого термодинамического цикла двигателя, так и установку высокоэффективных систем финишной очистки выхлопа.

Цель работы провести сравнительный анализ и систематизацию наиболее результативных технологических решений для минимизации эмиссии ДВС, а также оценить перспективы их коммерческого внедрения и синергетического эффекта.

Результаты исследований. Фундаментальным путем снижения вредных выбросов является управление процессами смесеобразования и горения непосредственно в камере сгорания.

Эволюция впрыска топлива: Переход к технологии прямого впрыска в цилиндр позволил перейти на качественно новый уровень контроля. Современные системы, например, с пьезоэлектрическим приводом форсунок, обеспечивают сверхточное дозирование и возможность нескольких впрысков за цикл[1]. Пилотная порция топлива смягчает нарастание давления, уменьшая шумность и выработку NOx, а дополнительная (пост-впрыск) используется для активной регенерации сажевых фильтров или обеспечения послойного смесеобразования. Достижение давления впрыска свыше 300 атмосфер приводит к микроскопическому распылу, обеспечивая практически полное и однородное сгорание, что сокращает эмиссию сажи и HC.

Гибридные стратегии смесеобразования: Режим послойного заряда (сверхбедная смесь у свечи при общем бедном составе) дает существенный выигрыш в топливной экономичности и снижает выбросы CO2. Его ключевым недостатком является локальный перегрев

и связанное с ним образование NOx и сажи. Решением стало создание двигателей с переменным режимом работы, которые автоматически переключаются между послойным смесеобразованием (для средних нагрузок) и гомогенным (для максимальных мощностей).

Рециркуляция выхлопных газов (EGR): Эта система признана базовой для подавления генерации оксидов азота. Ее принцип основан на разбавлении свежего заряда инертными компонентами выхлопа (CO2, H2O), что повышает теплоемкость смеси и снижает пиковую температуру сгорания — основной драйвер образования NOx. Современные моторы используют комбинацию высоко- и низконапорных контуров EGR, а также обязательное охлаждение возвращаемых газов для максимизации их эффекта.

Без перехода на новые энергоносители кардинальное сокращение углеродного следа транспорта невозможно[2].

Газомоторное топливо: Применение метана (КПГ) и пропан-бутана (СУГ) позволяет сразу сократить выбросы CO2 на 20-25%, практически исключить образование сажи и снизить NOx благодаря высокой детонационной стойкости и отличному смесеобразованию. Экологическим риском является утечка несгоревшего метана, потенциал глобального потепления которого многократно выше, чем у CO2, что требует совершенствования систем хранения и нейтрализации.

Биотоплива первого поколения: Биоэтанол и биодизель, производимые из сельхозкультур, формально считаются углеродно-нейтральными, так как выделяемый при сгорании CO2 ранее был поглощен растениями. Их применение (например, топливо E85) позволяет повысить степень сжатия и использовать более бедные смеси. Однако их производство конкурирует с продовольственным сектором, а биодизель может требовать доработки топливной аппаратуры.

Синтетические электротоплива (E-Fuels): Это наиболее перспективное направление для глубокой декарбонизации. В процессе Power-to-Liquid энергия из ВИЭ используется для электролиза воды, получения «зеленого» водорода и его синтеза с CO2 (извлеченным из воздуха или отходящих газов) в жидкое углеводородное топливо — бензин, дизель или метанол. Такое топливо является углеродно-нейтральным и полностью совместимо с существующими ДВС и инфраструктурой, выступая идеальным технологическим мостом.

Для доведения выбросов до норм «Евро-6» и выше даже самый совершенный двигатель требует установки сложных каталитических систем[3].

Каталитические нейтрализаторы: Для бензиновых моторов стандартом стал трехкомпонентный катализатор (TWC), работающий в узком диапазоне стехиометрического состава смеси. В дизелях применяется окислительный катализатор (DOC), преобразующий CO и HC, а также окисляющий NO до NO2 для работы следующих систем.

Сажевый фильтр (DPF): Керамический фильтр с ячеистой структурой стал обязательным элементом, улавливая до 99.9% твердых частиц. Накопленная сажа периодически выжигается в процессе высокотемпературной регенерации.

Система селективного каталитического восстановления (SCR): Это основной метод борьбы с NOx в дизельных двигателях. В выхлопной тракт впрыскивается водный раствор мочевины (AdBlue), который, разлагаясь, выделяет аммиак. На специальном катализаторе аммиак селективно реагирует с NOx, превращая их в безвредный азот и водяной пар. Эффективность современных систем SCR превышает 90%.

Интеграция ДВС в гибридный силовой агрегат решает проблему выбросов комплексно, особенно в городских условиях. Электродвигатель компенсирует пиковые нагрузки, позволяя ДВС работать в зоне максимального КПД. Рекуперативное торможение возвращает энергию в бортовую сеть, а функции старт-стоп и движение на электротяге исключают работу двигателя в самых неэффективных и «грязных» режимах.

Выводы. Проведенный обзор свидетельствует, что ресурс для экологизации классического ДВС еще значителен. Путь его развития лежит через синергию трех направлений: 1) внутренняя оптимизация цикла (точный впрыск, гибкое газораспределение, управляемая EGR); 2) внешняя глубокая очистка выхлопа (комплекс SCR+DPF+DOC); 3) принципиальная декарбонизация топлива (биотопливо, e-Fuels). В сочетании с гибридизацией, модернизированный ДВС на углеродно-нейтральном топливе может сформировать устойчивую альтернативу в тех сегментах транспорта, где чистая электрификация сегодня затруднена. Таким образом, будущее видится не в простом замещении, а в интеграции экологически совершенных ДВС в разнородную,

низкоуглеродную транспортную экосистему. ДВС нового поколения в многокомпонентную и экологически сбалансированную транспортную систему.

Библиографический список:

1. Голубков, А. А. Вредные выбросы в двигателях внутреннего сгорания и дальнейшие перспективные разработки по их снижению / А. А. Голубков. — Текст : электронный // Молодой ученый. — 2010. — № 1-2 (13). — С. 60-63. — URL: https://moluch.ru/archive/23/2387 (дата обращения: 15.11.2025).

2. Леончук, М. А. Вредные выбросы в двигателях внутреннего сгорания и дальнейшие перспективные разработки по их снижению / М. А. Леончук. — Текст : электронный // Alley-science : [сайт]. — 2022. — URL: https://alley-science.ru/domains_data/files/Avgust22/VREDNYE%20VYBROSY%20V%20DVIGATELYaH%20VNUTRENNEGO%20SGORANIYa,%20I%20DALNEYShIE%20PERSPEKTIVNYE%20RAZRABOTKI%20PO%20IH%20SNIZhENIYu.pdf (дата обращения: 15.11.2025).

3. Яковлев, С. Ю. Вредные выбросы двигателей внутреннего сгорания и перспективы их снижения / С. Ю. Яковлев. — Текст : электронный // Сборник научных работ студентов «Научная перспектива» : сайт ДонНТУ. — 2013. — URL: https://masters.donntu.ru/2013/fkita/rak/library/leonchuk.pdf (дата обращения: 15.11.2025).

STUDY OF METHODS FOR DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF MECHNOLOGIES IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES TO REDUCE ENVIRONMENTAL EMISSIONS

Dvoretsky R.A.
Scientific supervisor - Prokhorov S.G., Subaeva A.K.
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Chistopol branch "VOSTOK", Chistopol

Keywords: *internal combustion engine, environmental emissions, emission reduction, exhaust gas aftertreatment, catalytic converter, diesel particulate filter (DPF), exhaust gas recirculation (EGR), direct injection, alternative fuel, synthetic fuel (e-Fuels), hybrid powertrains, environmental standards.*

The article examines modern methods for reducing environmental emissions from internal combustion engines (ICE). The author analyzes key areas of development: optimization of combustion processes, the use of alternative fuels, and the implementation of exhaust gas a ftertreatment systems. Special attention is paid to the combined effect of these technologies and their role in meeting stringent environmental standards. The material is intended for specialists interested in the development prospects and environmental improvement of traditional power plants.